

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.011

# 柔性直流输电技术在风力发电系统中的应用

李 勇, 朱晓青, 秦 斌, 夏颂平

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 首先阐述了风力发电的基本知识与相关技术特点, 介绍了柔性直流技术(VSC-HVDC)在一些风电场输电工程中的应用以及我国的研究现状, 此项技术解决了目前风力发电场在进行远距离大功率电能输送方面的问题。通过分析以电压源换流器(VSC)为基础的新型直流输电技术的特点和基本原理, 说明此技术是目前较为理想的风力发电与电网连接的输电方式。最后, 利用Matlab/Simulink仿真软件对柔性直流技术(VSC-HVDC)建立仿真模型, 仿真结果说明, 此技术可以很好地解决风电场目前存在的大功率远距离输电问题。

**关键词:** 风力发电; 柔性直流输电技术; 电压源型换流器

**中图分类号:** TM743

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)01-0059-06

## Application of Flexible DC Transmission Technology in Wind Power System

Li Yong, Zhu Xiaoqing, Qin Bin, Xia Songping

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Expounds the basic knowledge of wind power generation and related technical characteristics, and introduces the VSC-HVDC application in electric energy transportation of wind farms and the research status in our country. The technology solves the current problem of long-distance high-power electric energy transportation of wind farms. Through the analysis of the VSC-based HVDC features and basic principle, indicates that the technology is currently ideal transmission way of wind generation and grid connection. The simulation on VSC-HVDC by Matlab/Simulink software shows that it well solves the current problem of remote electric energy transmission of power farms.

**Keywords:** wind power generation; flexible DC transmission technology; voltage source converter

## 1 背景知识

风能是一种新型的清洁能源。由于目前风电场的规模较小, 相邻站点的距离不远, 所以现在风电场主要采用的是高压交流输电。但是随着风电场规模的大型化, 相邻站点的传输距离变远之后, 解决长距离传输风电场产生的大规模电力成为目前研究者比较关心的问题。

目前, 基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的新型直流输电技术在国内外的多

个项目中逐渐获得应用。表1中给出了目前国内外已经成功应用柔性直流输电技术的部分实际工程。近年来我国也有成功应用此技术的实际工程<sup>[1-2]</sup>。

哥特兰岛(Gotland)工程项目: 1997年由ABB公司与Gotland能源公司在哥特兰岛建设的世界上第一个商业化的柔性直流输电工程, 1999年6月正式投入运行。此工程主要用于连接瑞典哥特兰岛和维斯比城, 它同时也是世界上第一个用于连接风电场和电网的柔性直流输电工程。

亚洲首条柔性直流输电示范工程: 上海南汇风

收稿日期: 2014-06-15

作者简介: 李 勇(1987-), 男, 山东青岛人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂过程控制与建模,

E-mail: 394488703@qq.com

电场柔性直流输电工程。这是我国第一条拥有完全自主知识产权、具有世界一流水平的柔性直流输电线路。它的成功投运标志着我国在智能电网高端装备等方面取得了重大突破,国家电网总公司也由此成为世界上少数几家掌握该项技术的公司。

表1 柔性直流输电技术的实际应用

Table 1 Application of flexible DC transmission technology

时间	工程名称	工程参数	
		功率/MW	电压/kV
1997	Hellsjon	400.0	± 10.0
1999	Gotland	50.0	± 80.0
1999	Directlink	180.0	± 80.0
2000	Eagle Pass	36.0	± 15.9
2000	Tjaereborg	7.2	± 9.0
2002	Murray Link	200.0	± 150.0
2005	Troll	84.0	± 60.0
2009	Nord E.ON1	400.0	± 150.0
2010	Tans Bay Cable	400.0	± 200.0
2011	China	20.0	± 30.0

以上几例成功运行的工程中应用的风力发电机普遍采用双馈型风力发电机。双馈型风力发电机发电所需要风速范围要求太高,发电量受限制,容易脱网,发电的经济性和稳定性很差,有三级行星齿轮箱,5年需要更换一次,维护成本较高,电网的适应性差,功率因数受限制,一般只能到0.9。而永磁直驱风力发电机可以在非常宽的风速范围运行,省去三级行星齿轮箱,可靠性高,电力电子变换装置不需要 Active Crowbar,功率因数几乎不受限制,完全可以看成挂在电网上一个无功发生器。

柔性直流输电是采用基于电压源换流器的新一代直流输电技术,它可以独立地控制其输出电压的相位和幅值,从而能够快速、灵活地调节其输出的有功功率和无功功率,不仅能够较好地解决风电和太阳能等绿色能源大规模并网问题,也能解决特大城市电网存在的结构薄弱、短路电流偏大、动态无功补偿不足等问题。

基于全控型器件(IGBT)的电压源换流器(VSC)的新型直流输电技术在以上实际工程中的成功应用充分说明了此项输电技术在远距离、大功率输电方面所具有的优势,并受到人们的广泛关注。

文章首先对永磁直驱风力发电系统以及直流输电的相关原理和技术特点做了简单的介绍。然后通过直流输电和交流输电的对比说明了直流输电所具有的优势。紧接着,着重对电压源型换流器(VSC)为基础的新型直流输电技术的基本原理和技术特点进行了分析,充分说明了柔性直流输电技术符合风电场对电能的传输距离远和输送容量大的要求。最

后,应用 Matlab/Simulink 仿真软件,根据柔性直流输电的数学模型搭建了仿真模型。仿真结果充分说明,此技术可以较好地解决目前风电场在进行远距离大功率传送等方面所存在的问题。

## 2 风力发电的基本原理以及远距离大功率传输

在恒定速度的同步发电机或异步发电机中,当风速变化时,风力涡轮机(发电机)依然保持速度恒定,以达到发出的电能频率恒定。此时,叶尖速比较低,因此大部分风力机在此状态下不能实现良好的风能转换效率。变速恒频风力发电机应用了一种新型的风力发电技术,它可以实现风电机组在最佳叶尖速比的状态下实时跟踪不同的风速运行,以达到最好风能捕获。变速恒频工作模式相对于恒速恒频模式而言,具有较高的运行效率,较强的吸收阵风的能力并且能够适当提高功率因数等方面的优势。目前有2种技术方案可以实现变速恒频,即:交流励磁双馈风力发电系统和永磁直驱风力发电系统。

永磁直驱同步发电系统中的风力机和同步发电机之间采用直接耦合的连接方式,这种方式节省了其它风力发电系统中的故障率高和难维护的增速齿轮箱,简化了发电系统的整体结构。因此,本文将永磁直驱风力发电系统作为研究对象。永磁直驱风力发电系统结构如图1所示。

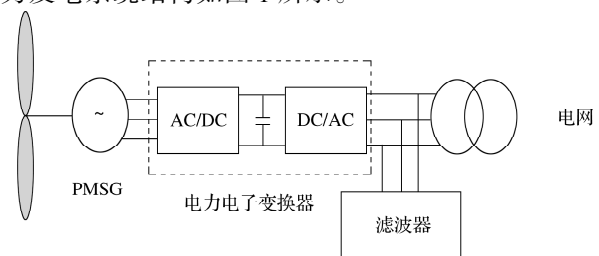


图1 永磁直驱风力发电系统结构示意图

Fig. 1 The structural diagram for permanent magnet direct drive wind power generation system

图1为单台永磁直驱同步发电系统的结构示意图,风力机与永磁同步发电机直接耦合,发电机发出的频率不稳定的三相交流电首先经过整流器变为电压稳定的直流电,然后经过逆变器变为频率稳定的三相交流电,最后经过升压变压器和大电网进行并网。

随着新的风电场的建设,装机总容量的日益扩大,远距离、大功率的传送成为急需解决的问题。

目前直流输电中的换流站采用半控型器件进行有源逆变,因此供电具有局限性,例如只能向有源负荷供电。此种换流方式在电网电压不足时容易导致换相失败,影响供电的可靠性。柔性直流输电采

用的是全控型的电力电子器件,因此柔性直流输电技术可以实现向无源网络和孤岛送电。

### 3 柔性直流输电技术的发展及优点

#### 3.1 柔性直流输电技术的发展

上世纪90年代末,ABB公司开发出灵活的高压直流(high voltage direct current, HVDC)技术,目前这项技术已成功应用于多个国家的项目和各种领域。2006年5月,我国召开研讨会,建议将此项技术命名为:柔性直流输电技术(VSC-HVDC)。

图2为柔性直流输电系统的示意图。左侧的交流系统为永磁直驱同步风力发电机发出的三相交流电,三相交流电经过换流变压器、换流电抗器以及滤波器等设备到达送端站VSC1,送端站VSC1将三相交流电整流成为电压稳定的直流电,紧接着经过直流输电线路到达受端站VSC2,受端站VSC2将直流电逆变成频率和电压稳定的三相交流电,最后经过受端站的换流电抗器、滤波器,换流变压器到达用户端。

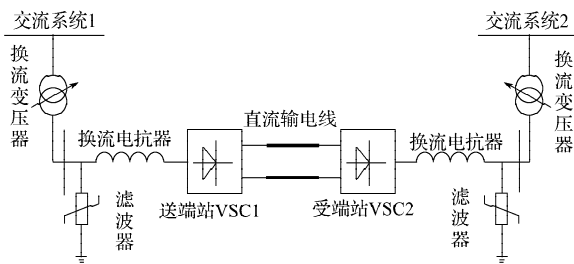


图2 VSC-HVDC输电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the VSC-HVDC transmission system

#### 3.2 柔性直流输电技术优点

1) 无稳定性问题。因为柔性直流输电技术对输电两端无同步要求,输电线路无电抗存在,因而无稳定性问题,即可以通过此技术进行远距离输电。

2) 不仅直流输电自身无稳定性问题存在,同时它还可以提高它两端交流输电系统的稳定性。

3) 节约线路的建设成本。交流输电线路需要使用3条电线进行输电,而直流输电线路则只需要使用2条电线即可达到预定效果。

4) 可以向无源网络、孤岛供电。换流站采用的是全控型的电力电子器件,无需强迫换流,因此可以实现向无源网络或者孤岛供电。

5) 可以进行大功率传送。

6) 在电力系统扩容及与其它系统相连接时,应用直流输电可隔离交流系统中存在的故障电流,使之不能进入原输电系统,不会增大系统的短路容量<sup>[3]</sup>。

## 4 柔性直流输电技术原理及数学模型

### 4.1 柔性直流输电技术原理

伴随着全控型电力电子技术的快速发展,柔性直流输电的换流站也得到快速的发展。柔性直流输电的基本原理见图3。送端和受端的换流站均采用全控型的电力电子器件(IGBT)。

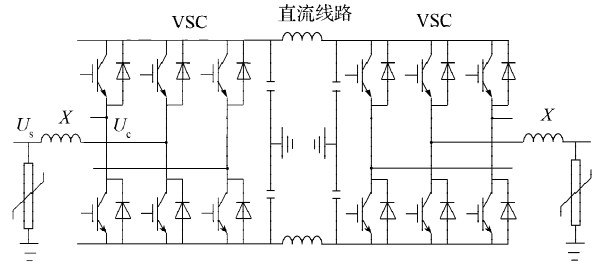


图3 柔性直流输电基本原理图

Fig. 3 Schematic of flexible DC transmission

图4为VSC的基波等效电路图。

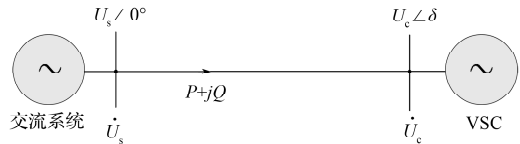


图4 VSC的基波等效电路

Fig. 4 Fundamental wave equivalent circuit of VSC

电压源型换流器和交流系统之间交换的有功功率P和无功功率Q为:

$$P = \frac{U_s U_c}{X_c} \sin \delta, Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{U_c} \quad (1)$$

式中:U<sub>c</sub>为换流站的输出电压的基波分量;U<sub>s</sub>为交流母线的电压基波分量;δ为U<sub>c</sub>和U<sub>s</sub>之间的相角差;X<sub>c</sub>为换流电抗器的电抗值。

通过上式可得,有功功率P主要取决于移相角δ。当移相角δ>0时,即有P>0,换流器发出有功功率,当移相角δ<0时,即有P<0,换流器吸收有功功率。同理,要想控制无功功率的大小和方向只需控制U<sub>s</sub>-U<sub>c</sub>cosδ的大小即可,当U<sub>s</sub>-U<sub>c</sub>cosδ>0时,即无功功率Q>0,换流站吸收无功功率,反之,当U<sub>s</sub>-U<sub>c</sub>cosδ<0时,即无功功率Q<0,则换流站向外发出无功功率<sup>[4-5]</sup>。

### 4.2 柔性直流输电数学模型

图5为电压源型换流器(VSC)的基本原理图。

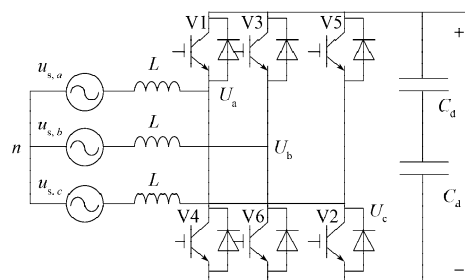


图5 电压源型换流器

Fig. 5 voltage source converter

根据图5的基本原理图型,对其做出简要分析,即

$$\begin{cases} u_{s,a} = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + u_a, \\ u_{s,b} = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + u_b, \\ u_{s,c} = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + u_c. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_{s,a}, u_{s,b}, u_{s,c}$  分为电压源处三相相电压;  $L$  为线路的感抗;  $R$  为线路的电阻;  $i_a, i_b, i_c$  分别为三相线路的相电流;  $u_a, u_b, u_c$  为交流侧的相电压。

将式(2)综合,可得

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = u_{s,abc} - Ri_{abc} - u_{abc}, \quad (3)$$

式中:  $i_{abc}$  为三相线路的三相相电流;  $u_{s,abc}$  经为三相电压源处的三相相电压;  $u_{abc}$  为三相交流侧的相电压。经过三相静止坐标系与  $dq$  坐标系之间的变换可以得出在两相坐标系下柔性直流输电系统的数学模型,见式(4)<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{s,d} - Ri_d - \omega Li_q, \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{s,q} - Ri_q - \omega Li_d. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_{s,d}$  和  $u_{s,q}$  分别为两相坐标系中的  $d$  轴电压和  $q$  轴电压;  $i_d$  和  $i_q$  则分别为两相坐标系的  $d$  轴电流和  $q$  轴电流;  $\omega$  为角速度。式(5)~(6)为三相静止坐标系与  $dq$  坐标系之间的变换矩阵

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$T^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由瞬时功率得出,在两相坐标系下变流器和交流输电系统之间的有功和无功分别为:

$$P = \frac{3}{2}(u_{s,d}i_d + u_{s,q}i_q), \quad Q = \frac{3}{2}(u_{s,d}i_q - u_{s,q}i_d). \quad (7)$$

以  $d$  轴电网电压定位时,  $u_{s,q}$  为零,由式(7)得:

$$P = \frac{3}{2}u_{s,d}i_d, \quad Q = \frac{3}{2}u_{s,d}i_q. \quad (8)$$

式(7)~(8)中:  $P$  和  $Q$  分别为有功功率和无功功率。通过式(8)可以看出,经过以上坐标变换以后,有功和无功可分别通过控制  $d$  轴和  $q$  轴电流来进行控制。

### 5 柔性直流输电技术在风力发电系统中的仿真

为了验证柔性直流输电技术在风力发电并网中的应用,根据前面章节介绍的柔性直流输电的相关原理以及数学模型,运用 Matlab/simulink 仿真软件搭建如下图6的仿真模型<sup>[7-8]</sup>。

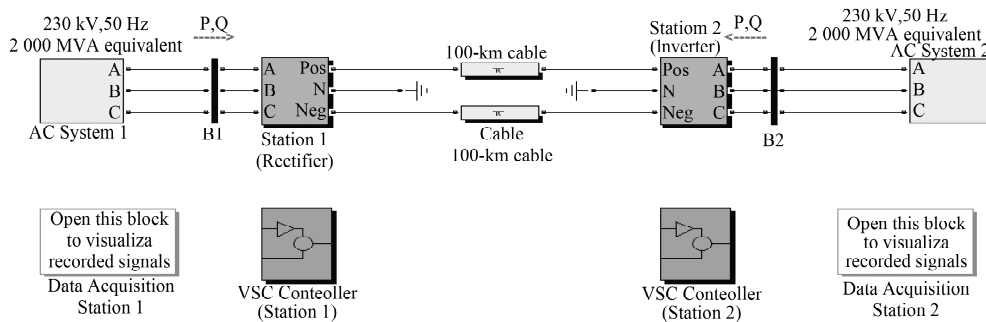


图6 柔性直流输电的仿真模型

Fig. 6 The simulation model of the flexible DC transmission

仿真参数为两端交流侧系统额定电压为 230 kV, 额定容量为 2 000 MVA, Station1 为直流输电的送端换流站, VSC Controller (Station1) 为它的控制系统, Station2 为受端换流站, VSC Controller (Station2) 为它的控制系统。直流输电线路的电压为  $\pm 100$  kV, 系统频率为 50 Hz, 直流滤波电容容量为 70  $\mu$ F, 直流平波电抗器 8 mH, 直流线路长度为 100 km, 线路采用  $\pi$  型等值线路。图 7 是送端站换流器的控制模型,

图 8 是受端换流器的控制模型。

图中为了实现有功功率和无功功率的解耦从而进行独立控制,所以送端换流站采用的是定有功功率和定无功功率的控制策略。受端换流站为了稳定直流电压和网侧的交流电压,因此采用的是定直流电压和定交流电压的控制策略<sup>[9]</sup>。

图 9~12 是通过 Matlab/Simulink 仿真软件对图 5 的模型做出的仿真结果。

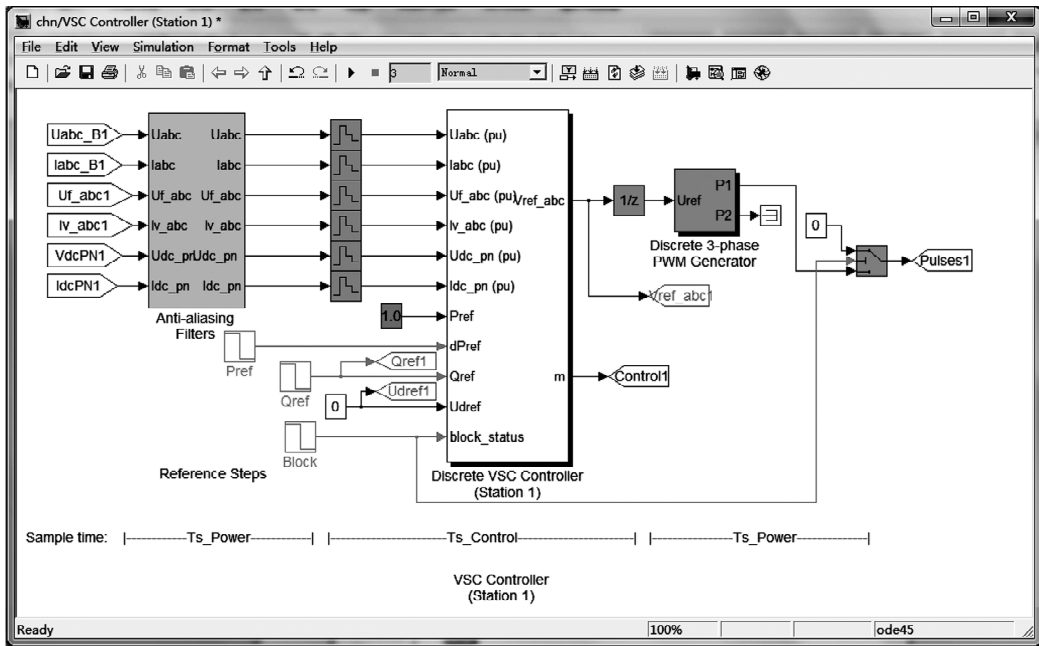


图7 送端站的控制模型 ( Station1 )  
 Fig. 7 Control model of sending end station (Station1)

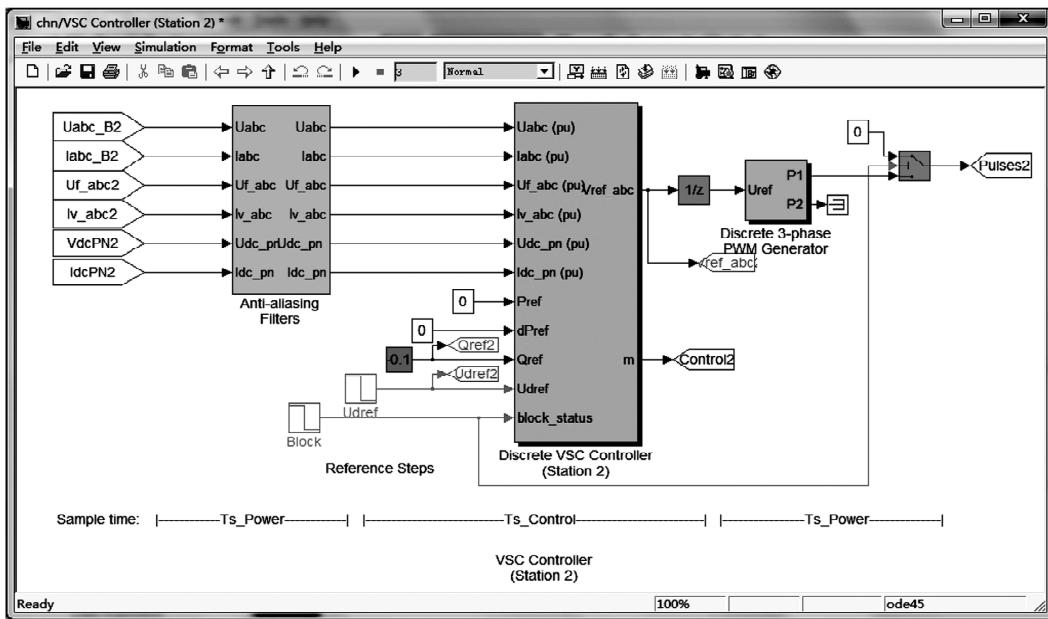


图8 受端站的控制模型 ( Station2 )  
 Fig. 8 Control model of receiving end station (Station2)

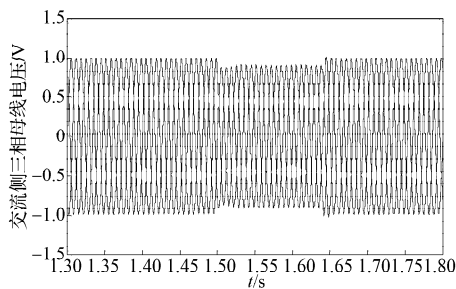


图9 交流侧三相母线电压  
 Fig. 9 AC side three-phase bus voltage

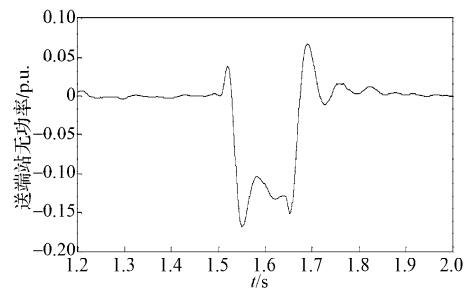


图10 送端站无功功率  
 Fig. 10 The reactive power of sending end station

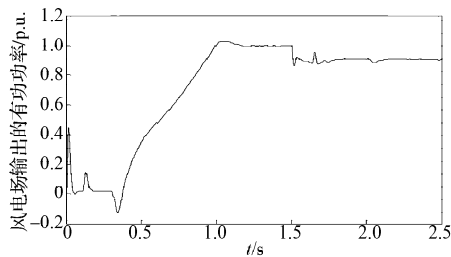


图11 风电场输出的有功功率

Fig. 11 The output active power of wind farm

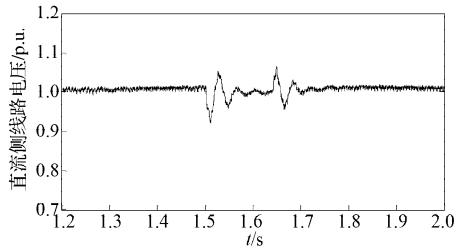


图12 直流侧线路电压

Fig. 12 DC side line voltage

由图9~12的仿真波形可以看出,当风电场侧的交流母线在1.5s发生电压跌落时,柔性直流输电线路上的控制器能够迅速做出反应。风电场侧输出的无功功率 $Q$ 、送端站的有功功率 $P$ 、直流侧的母线电压 $U$ 的跌落幅值都分别在0.10 p.u., 0.10 p.u., 0.09 p.u.以内,当故障消除以后,整个柔性直流输电系统能够在0.14s恢复到稳定运行状态,说明柔性直流输电系统具有很好的稳定性。

## 6 结语

在新型电力电子器件的飞速发展下,柔性直流输电技术较其它输电方式将更具有竞争性,在不远的将来将此项技术应用于新能源发电,生物发电,垃圾发电的并网、城市电网的输配电以及向孤岛送电和无源网络供电等方面将完全成为可能<sup>[10]</sup>。

总之柔性直流输电是一种基于电压源换流器的新型直流输电方式,随着研究的不断深入,相信不久的将来它将成为电能输送中不可或缺的一部分。

### 参考文献:

[1] 梁 晓. 基于轻型直流输电技术的并网风力发电系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
Liang Xiao. Research on Grid-Connected Wind Power System Based on VSC-HVDC Technology[D]. Changsha: Hunan University, 2013.

[2] 刘 静. 轻型直流输电建模及其在风力发电中的应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.  
Liu Jing. Development of VSC-HVDC Model and Its Application in Wind Power[D]. Baoding: North China

Electric Power University, 2008.

- [3] 李永坚, 周有庆, 宋 强. 柔性直流输电(HVDC Light)技术的发展与应用[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 26-28.  
Li Yongjian, Zhou Youqing, Song Qiang. The Development and Application of HVDC Light Technology[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 26-28.
- [4] 管敏渊, 徐 政. MMC型VSC-HVDC系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.  
Guan Minyuan, Xu Zheng. Optimized Capacitor Voltage Balancing Control for Modular Multilevel Converter Based on VSC-HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [5] 韩民晓, 尹忠东, 徐永海. 轻型电力技术-电力电子在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 26-34.  
Han Minxiao, Yin Zhongdong, Xu Yonghai. Application of Light Power and Power Electronic Technology in Power System[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007: 26-34.
- [6] 李广凯, 梁海峰, 赵成勇, 等. 适用于风力发电的输电技术-柔性高压直流输电技术[J]. 国际电力, 2004, 8(1): 35-40.  
Li Guangkai, Liang Haifeng, Zhao Chengyong, et al. HVDC Light: a Perfect Technology for the Connection Between Wind Fields and Power Systems[J]. International Power, 2004, 8(1): 35-40.
- [7] 尹玲玲, 胡育文. 交流电机变速恒频风力发电技术[J]. 电气传动, 2005, 35(10): 7-10.  
Yin Lingling, Hu Yuwen. Technology of Variable-Speed Constant Frequency Wind Generating Used AC Machine [J]. Electric Drive, 2005, 35(10): 7-10.
- [8] 黎献腾. 浅谈柔性直流输电技术应用[J]. 科技经济市场, 2008, 8(1): 7-10.  
Li Xianteng. Application of Flexible HVDC Technology[J]. Science & Technology Economy Market, 2008, 8(1): 7-10.
- [9] 吴俊宏, 艾 芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.  
Wu Junhong, Ai Qian. Research on Multiterminal VSC-HVDC System for Wind-Farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.
- [10] 傅晓帆, 周克亮, 程 明, 等. 风电场并网用VSC-HVDC的无差拍解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 157-164.  
Fu Xiaofan, Zhou Keliang, Cheng Ming, et al. Deadbeat Decoupling Control of VSC-HVDC Systems for Grid Connection of Wind Farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 157-164.

(责任编辑: 申 剑)